

# 东昆仑南缘布青山构造混杂岩带早古生代 白日切特中酸性岩浆活动: 来自锆石 U-Pb 测年 及岩石地球化学证据

刘战庆 裴先治 李瑞保 李佐臣 陈国超  
陈有炘 高景民 刘成军 魏方辉 王学良 张 刚

(长安大学西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室, 地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 在 1:50000 地质填图基础上, 运用剖面测制、岩石学、岩石地球化学及 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 法测年等方法, 对东昆仑南缘布青山构造混杂岩带内的白日切特中酸性岩浆岩岩块进行详细研究。结果表明: 白日切特剖面中酸性岩浆岩岩块主要由花岗闪长岩岩块和中酸性火山岩岩块组成, 其中花岗闪长岩锆石  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄为  $(441 \pm 6)\text{Ma}$  (MSWD=0.76), 流纹斑岩锆石  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄为  $(438 \pm 3)\text{Ma}$  (MSWD=2.0)。花岗闪长岩为高硅, 富铝、钠, 准铝质, 钠质钙碱性系列; 中酸性火山岩为硅饱和, 铝质, 钙碱性系列。二者稀土元素总量 ( $\sum \text{REE}$ ) 较低, LREE 相对富集, HREE 相对亏损, REE 配分曲线呈 LREE 分馏明显, HREE 分馏不明显右倾特征, 花岗闪长岩基本上无铕异常, 而中酸性火山岩具有弱的负铕异常, 均与岛弧钙碱性系列的特征相似, 与洋壳的俯冲消减作用有关, 代表了在早志留世东原特提斯洋壳俯冲消减而形成的火山弧产物, 为研究东特提斯洋演化进程提供了新证据。

关键词: 东昆仑南缘; 白日切特; 构造混杂岩; 中酸性火山岩; 花岗闪长岩; LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年; 岩石地球化学

中图分类号: P588.1 文献标志码: A 文章编号: 10100-3657(2011)05-1150-18

阿尼玛卿—布青山构造混杂岩带位于东昆仑造山带、西秦岭造山带与巴颜喀拉造山带之间, 属于古特提斯北缘分支洋盆和原特提斯洋构造体系复合交织的部位, 在中国大陆的形成演化中占据重要地位, 备受地学界的广泛关注<sup>[1-19]</sup>。该构造带东起勉略地区, 从文县向西沿东昆仑南缘的玛沁德尔尼经花石峡, 西至布青山, 再往西可以与东大滩南黑茨沟附近及木孜塔格山北坡的镁铁—超镁铁岩块体<sup>[8,20-21]</sup>相连, 全长约 700 km。因其内部存在多期蛇绿岩, 也被称为蛇绿混杂岩带, 其中早古生代的蛇绿岩代表了

原特提斯洋壳, 晚古生代蛇绿岩代表了古特提斯洋最北缘分支洋盆关闭后的洋壳残余体<sup>[8,15,19,22-25]</sup>; 也有学者<sup>[1,26-27]</sup>提出可能存在晚二叠—中三叠世的蛇绿岩。这说明阿尼玛卿—布青山构造混杂岩带具有复杂的物质组成和洋陆演化历史。

前人曾在阿尼玛卿—布青山构造混杂岩带发现了与洋壳俯冲作用相关的加里东期岛弧花岗岩<sup>[5,9]</sup>及晚古生代岛弧火山岩<sup>[17,26]</sup>。笔者 2009 年在布青山地区进行 1:50000 地质填图过程中首次发现了前人未曾报道过的白日切特早志留世岛弧型花岗闪长岩和

收稿日期: 2011-06-23; 改回日期: 2011-08-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(41172186、40972136、40572121)、中央高校基本科研业务费专项资金(CHD2009JC053、CHD2009JC046、CHD2009JC070)及青海省国土资源厅—中国铝业公司公益性区域地质矿产调查基金项目(中铝基金 200801)联合资助。

作者简介: 刘战庆, 男, 1975 年生, 博士生, 主要从事构造地质和区域地质研究; E-mail: liu\_zq100157@sohu.com。

通讯作者: 裴先治, E-mail: peixzh@263.net。

中酸性火山岩。本文拟从锆石年代学及岩石地球化学方面对其进行分析讨论,为研究阿尼玛卿—布青山构造混杂岩带洋陆演化提供约束。

## 1 区域地质背景

东昆仑南缘布青山构造混杂岩带位于阿尼玛卿—布青山构造带西段,夹持于东昆仑造山带与巴颜喀拉造山带之间,呈 NWW 向延展,长约 300 km,宽 10~20 km;西起东大滩,东至冬给措纳湖,以出露大量的蛇绿岩为特征,自东向西出露较好的地段为莫格通、可可尔塔、得力斯坦、哈拉翁及马尼特等<sup>[14]</sup>。北侧以东昆仑断裂与东昆仑造山带分界,南侧以长石头山断裂与巴颜喀拉造山带分界。布青山构造混杂岩带除了出露一套上石炭统—下二叠统树维门科组( $C_2P_{1sh}$ )碳酸盐岩推覆体以及零散分布的上二叠统格曲组( $P_{3g}$ )磨拉石沉积以外,主要由具有复理石沉积特征的马尔争组( $P_{1-2m}$ )基质岩系以及不同时代、不同类型、不同规模的构造岩块(片)组成,构成典型的构造混杂岩带(图 1)。基质部分的中—下二叠统马尔争组( $P_{1-2m}$ )复理石沉积,岩性主要为砂岩、杂砂岩、岩屑砂岩、粉砂岩、粉砂质板岩、泥质板岩等碎屑岩组合,夹有硅质灰岩、灰岩和紫红色硅质泥质岩,具有明显的沉积韵律组合,主体为深水浊积岩组合。构造岩块主要包括以下类型:①早古生代和晚古生代的两期蛇绿岩片(块):多呈透镜状断续产出,与围岩呈断层接触关系,主要由蛇纹岩、辉长岩、辉绿岩、变玄武岩等组成;②海山玄武岩与灰岩组合:出露于蛇绿岩南侧地区,多呈透镜状近东西向断续分布,玄武岩发育枕状、块状、角砾状构造,绝大部分地带上覆富含生物化石灰岩,构成典型的海山组合;③中元古代中深变质岩块:归属于苦海岩群( $Pt_k$ ),多位于蛇绿岩带北侧,零星分布,由大理岩、斜长角闪片岩、变粒岩及片麻岩类等组成;④异地型花岗质岩块:分布于布青山构造混杂岩的北侧,主要有早古生代的亿可哈拉尔岛弧型花岗闪长岩块( $438\pm 2$ )Ma(裴先治等,未刊资料)及白日切特花岗闪长岩块组成,还分布一些原地型的小型石英闪长岩岩体。

## 2 地质及岩相学特征

在布青山西侧白日切特地区的野外地质调查过程中,笔者首次发现了前人未曾报道过的白日切特

花岗闪长岩块和一套中酸性火山岩块。花岗闪长岩岩块主要出露于布青山地区白日切特沟,呈北西—南东向展布的长条状岩块,北侧与马尔争组( $P_{1-2m}$ )浊积岩呈断层接触关系,南侧与中酸性火山岩呈断层接触关系,南西部被树维门科组( $C_2P_{1sh}$ )碳酸盐岩推覆体掩盖,出露面积约 3.5 km<sup>2</sup>(图 1)。中酸性火山岩块主要由英安斑岩、流纹斑岩、少量安山岩等岩石组成。该火山岩系仅出露于白日切特沟南侧,位于花岗闪长岩块的南侧,呈不规则块体状产出,出露面积约 4 km<sup>2</sup>(图 1),南北两侧与围岩均呈高角度逆冲断层接触关系,有少量墨绿—黑色块状中粒辉长岩块和灰岩岩块“夹持”其中(图 2)。中酸性火山岩和花岗闪长岩在地貌上表现为突起的山峰。

花岗闪长岩块主要岩性为中粒—粗粒花岗闪长岩,岩石呈浅灰绿色,半自形粒状结构,块状构造及较弱的片麻状构造。主要由斜长石(约 50%)、钾长石(约 15%)、石英(约 20%)及角闪石(约 10%)和黑云母(约 5%)组成。斜长石粒径为 2~6 mm,呈半自形粒状,表面浑浊不清。钾长石与斜长石颗粒大小相当,但自形程度略低。可能由于结晶后受到应力挤压作用的影响,长石破碎明显,也有明显的旋转构造特征。石英颗粒相对较细小,粒径为 0.1~0.3 mm。石英似基质充填于斜长石间隙之中,有时其集合体绕斜长石而过(图 3-a),石英波状消光。少量长石蚀变为绢云母与高岭土,角闪石及黑云母多已蚀变为绿泥石,使岩石呈现浅灰绿色。岩石局部有明显碎裂现象,不规则裂纹纵横交错,裂纹被铁质及绿泥石充填(图 3-b)。

中酸性火山岩主要岩性为英安斑岩、流纹斑岩,局部发育少量安山岩。英安斑岩、流纹斑岩,呈浅灰绿—灰绿色,斑状结构,块状构造、流动状构造,原生的流动状构造褶皱变形显著(图 3-c),少数具眼球状构造。岩石斑晶含量 15%~25%,主要为斜长石、石英及钾长石晶体。斑晶粒径为 1~4 mm,石英斑晶呈次圆状,长石斑晶呈不规则的板柱状。斑晶零散分布于基质中。基质含量为 75%~85%,具有变余结构、细粒状变晶结构,主要矿物有斜长石、钾长石、石英、绿帘石(15%)及少量绿泥石,部分矿物已重结晶,长石及石英呈不规则粒状变晶,粒径为 0.1~0.15 mm,大体定向平行分布,且绕斑晶而过(图 3-d)。绿帘石与绿泥石分布不均匀,呈网格状及不规则片状,细条纹状与浅色矿物相间分布。中酸性火山岩中局部有少

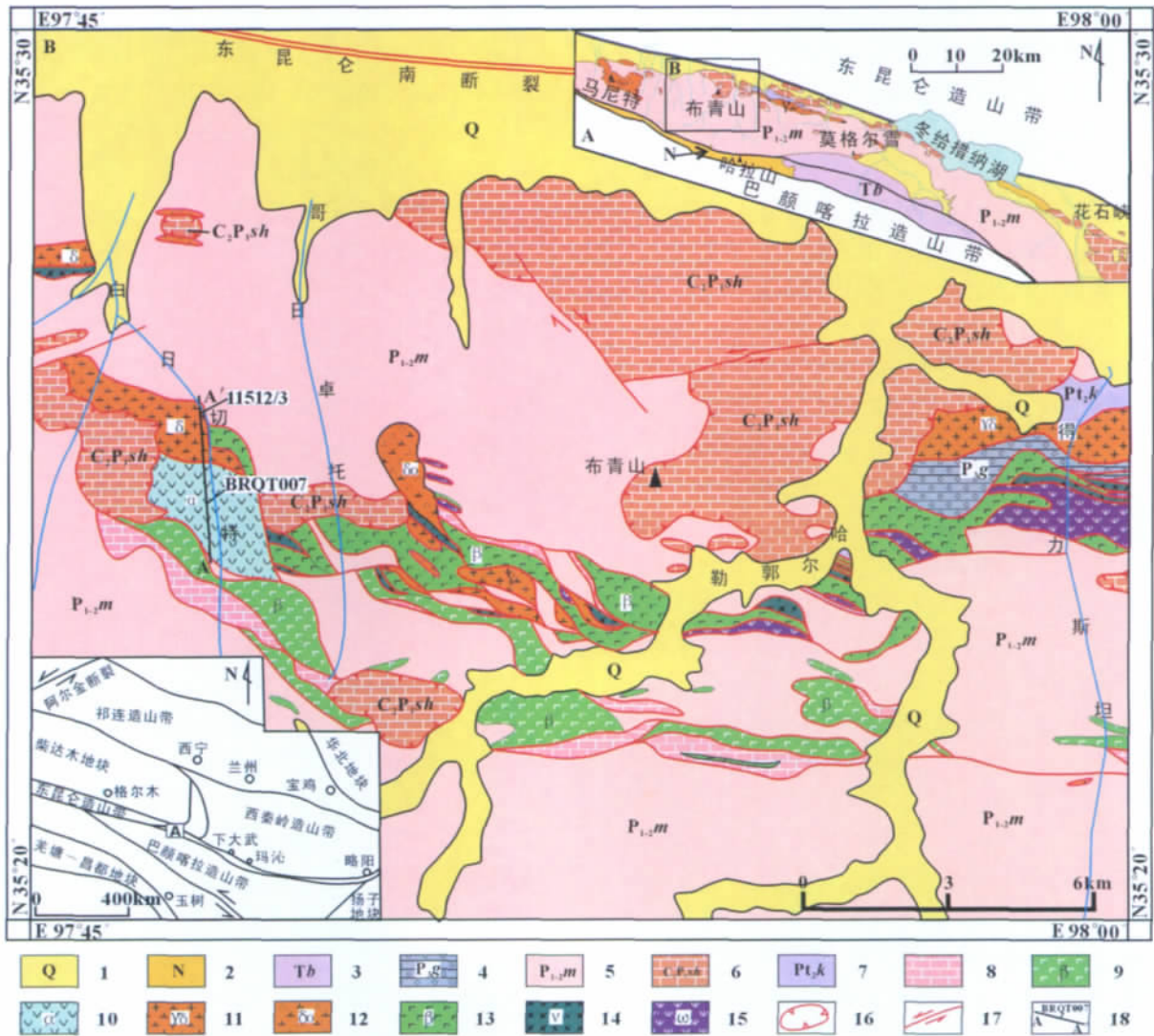


图1 阿尼玛卿构造带布青山地区地质简图

1—第四系;2—新近系;3—三叠系巴颜喀拉山群;4—上二叠统格曲组;5—中-下二叠统马尔争组;6—上石炭统-下二叠统树维门科组灰岩;7—中元古界苦海岩群;8—海山灰岩;9—海山玄武岩;10—早志留世中酸性熔岩;11—早志留世花岗岩闪长岩;12—印支期石英闪长岩;13~15—蛇绿岩;13—玄武岩;14—辉长岩;15—蛇纹岩;16—推覆体;17—走滑断层;18—剖面位置

Fig.1 Simplified geological map of Buqingshan area in the A'nyemaqen orogenic belt

1—Quaternary; 2—Neogene; 3—Triassic Bayan Har Group; 4—Upper Permian Gequ Formation; 5—Middle and Lower Permian Maerzeng Formation; 6—Upper Carboniferous-Lower Permian Shuweimenke Formation; 7—Mesoproterozoic Kuhai Group; 8—Seamount limestone; 9—Seamount basalt; 10—Early Silurian dacite-andesite; 11—Early Silurian granodiorite; 12—Indo-Chinese quartz diorite; 13~15—Ophiolite; 13—Basalt; 14—Gabbro; 15—Serpentinite; 16—Nappe; 17—Strike fault; 18—Section and sampling location

量的安山岩,颜色为深灰-灰绿色,呈块状构造,流动状构造,斑状结构。岩石斑晶含量 5%~10%,主要为斜长石和少量角闪石,粒径 2~3 mm。基质含量为 90%~95%,主要矿物由斜长石、角闪石针状微晶及玻璃质组成,还有少量绿泥石等蚀变矿物集合体。

### 3 锆石 U-Pb 年龄测定

#### 3.1 采样位置及测试方法

对白日切特花岗岩闪长岩和流纹斑岩分别采集了同位素年龄样品(11512/3 和 BRQT007)进行 LA-IPC-MS 锆石 U-Pb 测年,采样点地理坐标分别为:

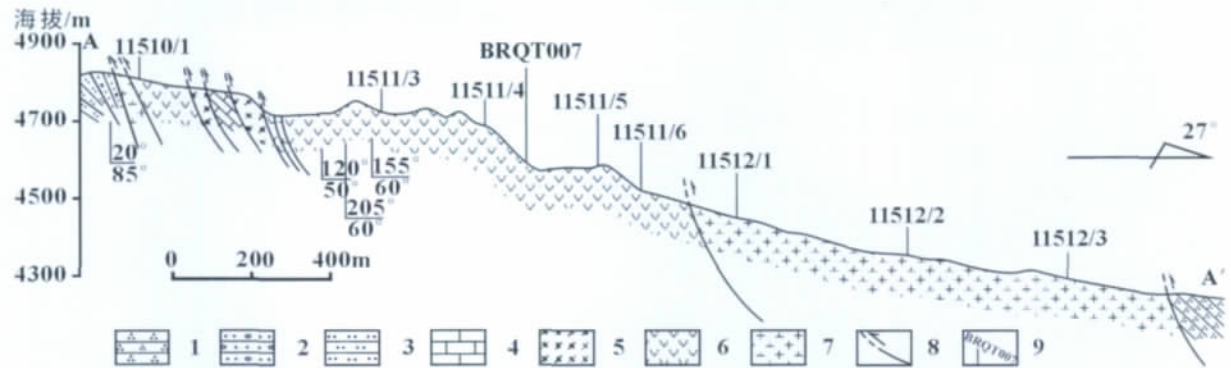


图 2 布青山地区白日切特地质剖面图

1—石英砂岩;2—细砾砂岩;3—粉砂岩;4—灰岩;5—辉长岩;6—中酸性火山岩;7—花岗闪长岩;8—逆冲断层;9—样品位置及编号

Fig.2 Geological section of Bairiqiete in Buqingshan area

1—Quartzose sandstone; 2—Granule sandstone; 3—Siltstone; 4—Limestone; 5—Gabbro; 6—Intermediate-acid volcanic rock; 7—Granodiorite; 8—Thrust fault; 9—Sampling location and its serial number

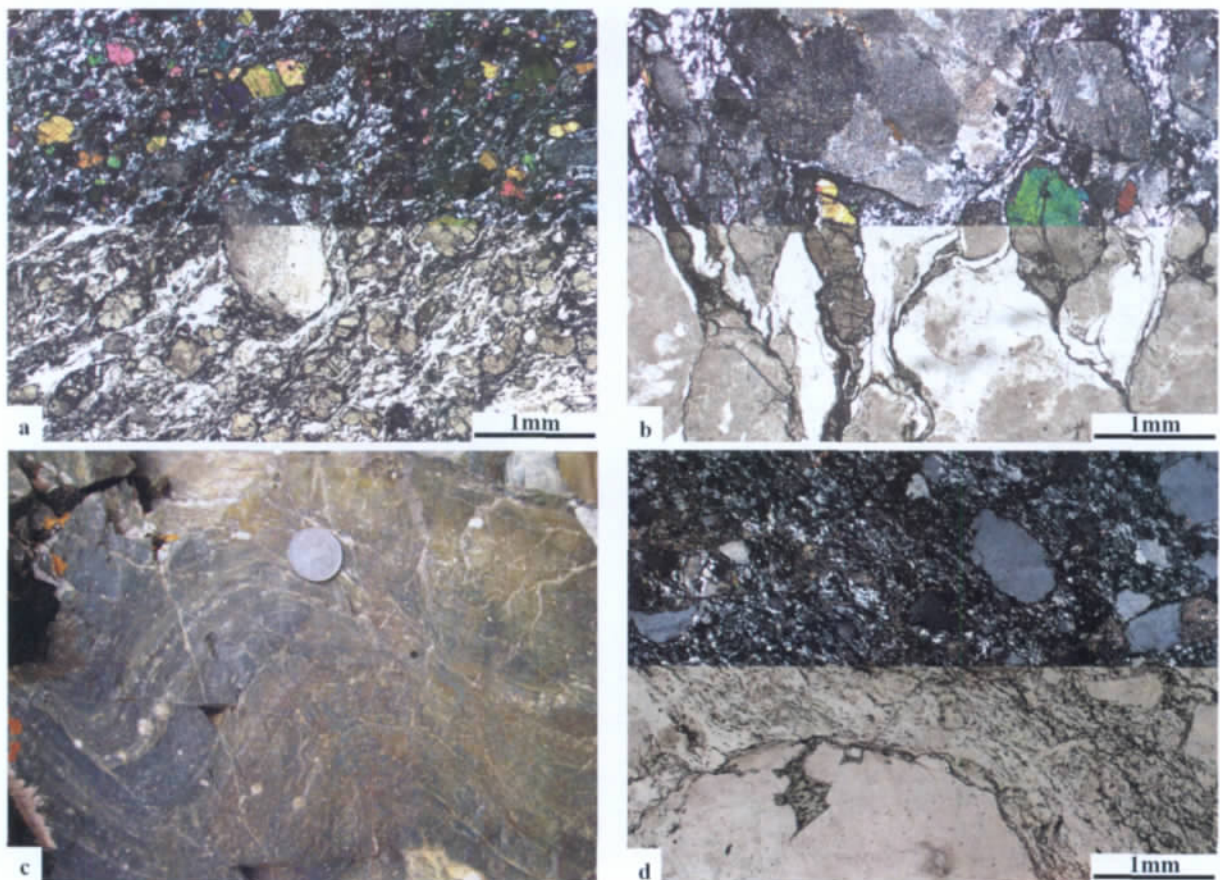


图 3 白日切特花岗闪长岩与流纹斑岩岩石特征

a—细粒花岗闪长岩;b—粗粒花岗闪长岩;c—流纹斑岩变形的流动状构造;d—流纹斑岩 (a,b,d 正交偏光(上),单偏光(下))

Fig.3 Lithologic features of Bairiqiete granodiorite and rhyodacite

a—Fine-grained granodiorite; b—Coarse-grained granodiorite; c—Rhyolite porphyry flow structure and deformation; d—Rhyolite porphyry (a, b, d crossed nicols (upper), plainlight (lower))

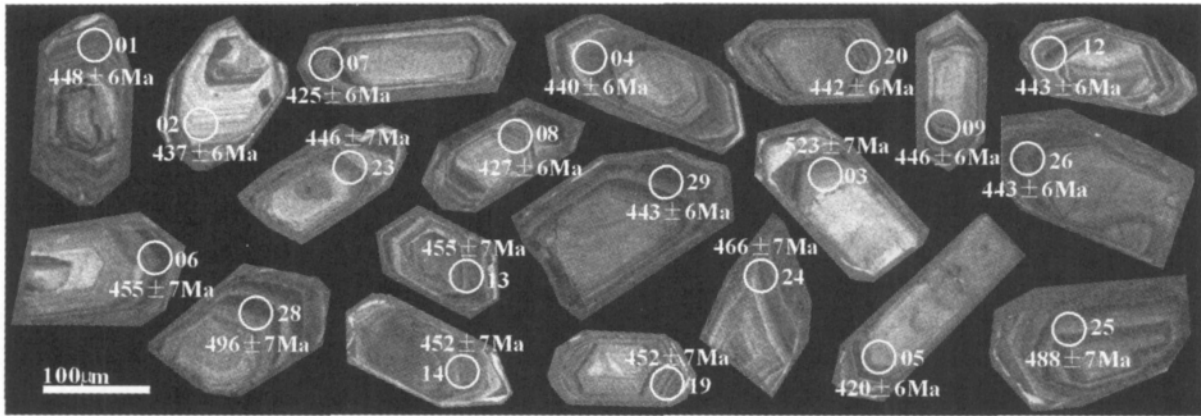


图4 白日切特花岗闪长岩(11512/3)锆石的 CL 图像和  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄  
Fig.4 CL images and  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  ages of zircons from Bairiqiete granodiorite (11512/3)

$35^{\circ}25.480' \text{N}$ ,  $97^{\circ}47.150' \text{E}$ ;  $35^{\circ}24.662' \text{N}$ ,  $97^{\circ}47.026' \text{E}$ , 各样品采集质量均大于 15 kg。

分别将所采测年样品用常规方法粉碎至 80~100 目, 利用常规的人工淘选和磁选法挑选出锆石, 在双目显微镜下精选晶型和透明度较好的锆石, 用无色透明环氧树脂固定制靶, 使用砂纸将锆石磨到内部暴露并抛光。在北京离子探针中心完成锆石的反射光和阴极发光 (CL) 显微照相, 根据锆石反射光照片和 CL 照片选取无裂隙和包裹体的区域作为测试点; 锆石原位 U-Pb 同位素年龄分析在西北大学大陆动力学国家重点实验室激光剥蚀电感耦合等离子体质谱仪 (LA-ICP-MS) 进行。详细的实验原理和流程、仪器、测试步骤和数据处理方法见参考文献 [28-31]。

### 3.2 花岗闪长岩 (11512/3) 锆石特征及分析结果

测试样品 (11512/3) 中的锆石多数晶粒为无色透明至淡黄色, 呈自形程度较好的短柱状、双锥状、半截锥状。晶体长 100~200  $\mu\text{m}$ , 宽 50~150  $\mu\text{m}$ , 长宽比为 3:2~4:1。阴极发光 (CL) 照片显示大多数锆石具有典型的岩浆韵律环带和明暗相间的条带结构 (图 4), 其中部分锆石 (01、02、06) 具有明显的残留核, 可能为继承核或捕获核, 为了避免继承锆石对测年的干扰, 确保定年的准确性, 测点尽量选在明显的岩浆环带上。测试获得 23 个有效点, 结果显示 (表 1), 锆石具有较高的 Th/U 比值 (除了 04 点外均大于 0.1),  $\text{Th}=62.86 \times 10^{-6} \sim 582.13 \times 10^{-6}$ ,  $\text{U}=392 \times 10^{-6} \sim 1797 \times 10^{-6}$ , 且 Th、U 呈正相关关系, 以上特征表明了锆石为岩浆结晶产物 [32-35]。在谐和图上, 有 4 个测点 (03、18、25、28) 分布较散, 有的偏离谐和线, 表明

有 Pb 的丢失, 而且  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄值偏高, 可能属于岩浆侵位时捕获的锆石。其余 19 个测点分布集中, 且  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  和  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$  谐和性较好, 表明锆石在形成后其 U-Pb 体系一直保持封闭状态, 基本上没有 Pb 的丢失, 其  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄为  $(441 \pm 6) \text{Ma}$  ( $\text{MSWD}=0.76$ ) (图 5), 与下交点年龄为  $(421 \pm 47) \text{Ma}$  在误差范围内一致, 代表了白日切特花岗闪长岩的结晶年龄, 因此将白日切特花岗闪长岩侵位年龄确定为  $(441 \pm 6) \text{Ma}$ , 其形成时代为早志留世初期。

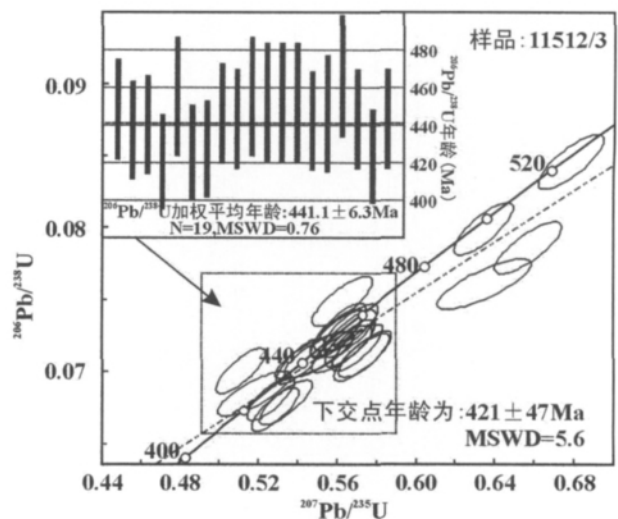


图5 白日切特花岗闪长岩(11512/3)中锆石的 U-Pb 谐和图

Fig.5 Zircon U-Pb concordia diagrams of Bairiqiete granodiorite (11512/3)

表 1 白日切特花岗岩长岩 (11512/3) LA-ICP-MS 锆石 U-Th-Pb 同位素测试结果  
Table 1 U-Th-Pb isotope compositions of zircons of the 11512/3 sample in Bairiqete granodiorite, measured by LA-ICP-MS

测试点号	元素含量 / 10 <sup>-6</sup>				同位素比值										年龄 / Ma					
	<sup>206</sup> Pb	<sup>232</sup> Th	<sup>238</sup> U	Th/U	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	1 σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	1 σ	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	1 σ	<sup>208</sup> Pb/ <sup>232</sup> Th	1 σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	1 σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	1 σ	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	1 σ	<sup>208</sup> Pb/ <sup>232</sup> Th	1 σ
01	301	324	952	0.34	0.05706	0.00167	0.56670	0.0085	0.07200	0.0011	0.02433	0.0003	494	15	456	5	448	6	486	6
02	121	181	392	0.46	0.05237	0.00157	0.50612	0.0083	0.07006	0.0010	0.02301	0.0003	302	17	416	6	437	6	460	6
03	345	170	996	0.17	0.05815	0.00173	0.67853	0.0108	0.08459	0.0013	0.03505	0.0005	535	16	526	7	523	7	696	10
04	351	63	1188	0.05	0.05552	0.00162	0.54154	0.0082	0.07072	0.0011	0.02933	0.0005	433	15	439	5	440	6	584	9
05	392	546	1339	0.41	0.05690	0.00166	0.52872	0.0079	0.06736	0.0010	0.02267	0.0003	488	15	431	5	420	6	453	6
06	175	138	558	0.25	0.05570	0.00164	0.56183	0.0086	0.07312	0.0011	0.02570	0.0003	440	15	453	6	455	7	513	7
07	343	283	1228	0.23	0.05602	0.00165	0.52644	0.0080	0.06813	0.0010	0.02264	0.0003	453	15	429	5	425	6	453	6
08	484	408	1756	0.23	0.05487	0.00154	0.51802	0.0123	0.06847	0.0010	0.02137	0.0003	407	64	424	8	427	6	427	6
09	408	385	1323	0.29	0.05770	0.00170	0.57040	0.0086	0.07167	0.0011	0.02452	0.0003	518	15	458	6	446	6	490	6
12	275	318	880	0.36	0.05848	0.00173	0.57442	0.0089	0.07121	0.0011	0.02426	0.0003	548	15	461	6	443	6	484	6
13	199	176	578	0.30	0.05629	0.00169	0.56734	0.0091	0.07307	0.0011	0.02339	0.0003	464	16	456	6	455	7	467	6
14	482	346	1521	0.23	0.05655	0.00167	0.56697	0.0086	0.07268	0.0011	0.02424	0.0003	474	15	456	6	452	7	484	6
16	331	410	1080	0.38	0.05586	0.00168	0.56019	0.0090	0.07271	0.0011	0.02229	0.0003	447	16	452	6	452	7	446	6
18	253	191	773	0.25	0.06054	0.00177	0.63501	0.0158	0.07608	0.0012	0.02347	0.0003	623	64	499	10	473	7	469	7
19	345	582	1116	0.52	0.05596	0.00167	0.56032	0.0087	0.07259	0.0011	0.02459	0.0003	451	16	452	6	452	7	491	6
20	360	325	1257	0.26	0.05848	0.00177	0.57268	0.0093	0.07100	0.0011	0.02585	0.0004	548	16	460	6	442	6	516	7
23	314	244	1073	0.23	0.05697	0.00179	0.56263	0.0103	0.07159	0.0011	0.03115	0.0006	490	18	453	7	446	7	620	11
24	132	175	405	0.43	0.05400	0.00169	0.55783	0.0101	0.07490	0.0011	0.02328	0.0003	371	18	450	7	466	7	465	7
25	235	166	695	0.24	0.06060	0.00186	0.65718	0.0112	0.07862	0.0012	0.02916	0.0004	625	16	513	7	488	7	581	8
26	362	247	1175	0.21	0.05595	0.00159	0.54861	0.0132	0.07112	0.0011	0.02214	0.0003	450	65	444	9	443	6	443	7
27	214	331	706	0.47	0.05704	0.00173	0.53414	0.0088	0.06788	0.0010	0.02318	0.0003	493	16	435	6	423	6	463	6
28	357	236	1038	0.23	0.05755	0.00172	0.63446	0.0099	0.07992	0.0012	0.02653	0.0004	513	15	499	6	496	7	529	7
29	538	339	1797	0.19	0.05615	0.00147	0.55120	0.0118	0.07119	0.0011	0.02216	0.0003	458	60	446	8	443	6	443	6

注:有效测试点 23 个。

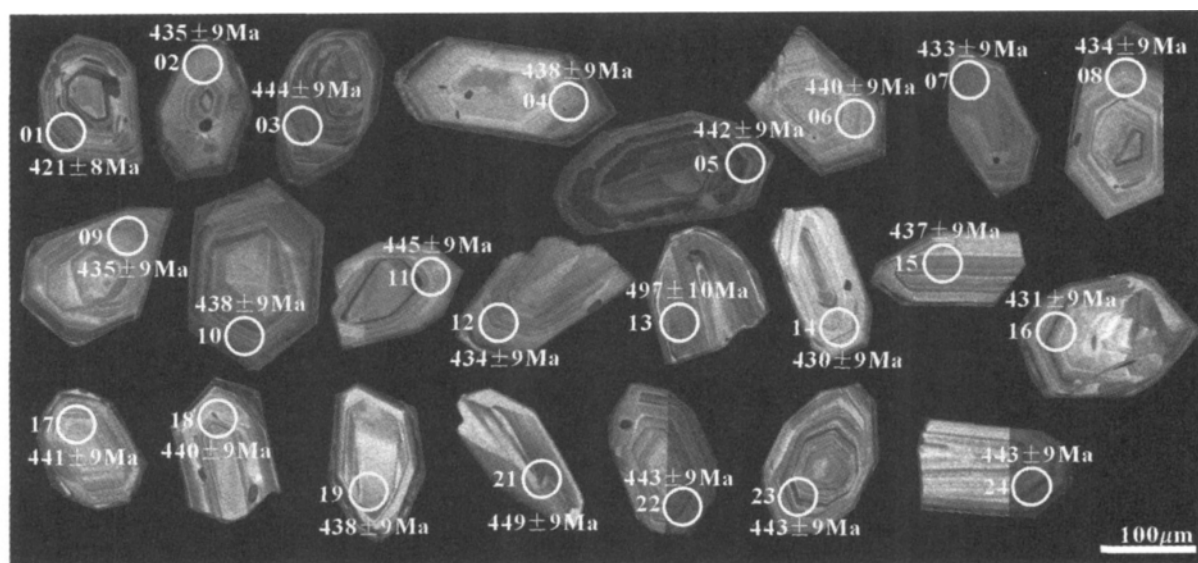


图 6 白日切特流纹斑岩(BRQT007)锆石的 CL 图像和  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄  
Fig.6 CL images and  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  ages of zircons from Bairiqiete rhyolite porphyry (BRQT007)

### 3.3 流纹斑岩 (BRQT007) 锆石特征及分析结果

流纹斑岩测年样品 (BRQT007) 中, 锆石晶体颗粒呈无色透明至浅黄色透明晶体, 晶形呈短柱状、双锥状、半截锥状和不规则状 (图 6)。大多数锆石晶体颗粒自形程度很好, 晶体长度为  $150\sim 250\mu\text{m}$ , 宽度为  $60\sim 150\mu\text{m}$ , 晶体长宽比值为  $2:1\sim 3:2$ 。阴极发光 (CL) 照片显示大多数锆石具有典型的岩浆成因的振荡韵律环带和明暗相间的条纹状结构, 表明为岩浆结晶产物, 其中少部分锆石具有明显的残留核, 可能为较老的锆石继承核或捕获核, 将测点位置尽量选择明显的岩浆环带上或者内部无裂隙或包裹体的位置, 以确保定年的准确性。样品 BRQT007 测试获得 24 个有效点, 同位素比值和年龄数据 (表 2) 表明, 锆石具有较高的 Th/U 比值 ( $0.35\sim 1.04$ ), 表明属于岩浆成因的锆石,  $\text{Th}=60.58\times 10^{-6}\sim 835.38\times 10^{-6}$ ,  $\text{U}=171.29\times 10^{-6}\sim 1985.04\times 10^{-6}$ , 且 Th、U 均呈现出正相关关系。

样品 (BRQT007) 共测试 24 个点, 其中 22 个测点数值集中于一个小的范围内, 这 22 个点的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  和  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$  谐和性较好, 表明在锆石结晶后它的 U-Pb 体系一直保持封闭状态, 基本上无 Pb 丢失, 而 13 号测点虽分布在谐和线上, 但较为分散,  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄为 497 Ma, 可能属于岩浆侵位时捕获的锆石年龄, 20 号测点偏离谐和线较远, 可能为铅

丢失所致, 故将其剔除。其余 22 个测点在谐和图上, 得到的下交点年龄为  $(441\pm 7)\text{Ma}$ ,  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄为  $(438\pm 3)\text{Ma}$  ( $\text{MSWD}=2.0$ ) (图 7), 两者在误差范围内一致, 代表了白日切特流纹斑岩结晶年龄, 因此将白日切特中酸性火山岩喷发后冷凝结晶年龄确定为  $(438\pm 3)\text{Ma}$ , 其形成时代也为早志留世初期。

## 4 岩石地球化学特征

### 4.1 样品采集与分析方法

测试样品采自白日切特沟, 其中花岗闪长岩有 3 个样品, 中酸性火山岩有 5 个样品, 岩石多发生绿泥石、绿帘石蚀变作用, 采样位置见图 2。

采集的岩石地球化学样品的碎样工作在河北省廊坊区域地质矿产调查研究所实验室完成, 样品磨碎至 200 目后, 在中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室完成地球化学成分测试。主量元素使用 X-射线荧光光谱仪 (XRF-1500) 法测试。采用 0.6 g 样品与 6 g 四硼酸锂制成的玻璃片在 Shimadzu XRF-1500 上测定氧化物的含量, 精度优于  $2\%\sim 3\%$ 。微量与稀土元素利用酸溶法制备样品, 使用 ICP-MS (Element ) 测试, 分析精度按照 GSR-1 和 GSR-2 国家标准, 当元素含量  $>10\times 10^{-6}$  时, 其精度优于  $5\%$ ; 当含量  $<10\times 10^{-6}$  时, 其精度优于  $10\%$ 。分析结果见表 3。

表 2 白日切特流纹斑岩 (BRQT007) LA-ICP-MS 锆石 U-Th-Pb 同位素测试结果  
Table 2 U-Th-Pb isotope compositions of zircons of the BRQT007 sample in Bairiqiete rhyolite porphyry, measured by LA-ICP-MS

测试 点号	元素含量 / 10 <sup>-6</sup>				同位素比值												年龄 / Ma				
	<sup>206</sup> Pb	<sup>232</sup> Th	<sup>238</sup> U	Th/U	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	<sup>208</sup> Pb/ <sup>232</sup> Th	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	<sup>208</sup> Pb/ <sup>232</sup> Th	<sup>206</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	<sup>208</sup> Pb/ <sup>232</sup> Th	1σ	1σ					
01	146	247	505	0.49	0.05903	0.0022	0.54984	0.0164	0.06756	0.0014	0.02212	0.0010	0.0010	568	32	445	11	421	8	442	19
02	59	977	196	0.50	0.05655	0.0023	0.54380	0.0182	0.06976	0.0015	0.02336	0.0010	0.0010	474	39	441	12	435	9	467	21
03	210	2397	687	0.35	0.05628	0.0021	0.55351	0.0159	0.07133	0.0015	0.02435	0.0011	0.0011	463	31	447	10	444	9	486	21
04	58	757	194	0.39	0.06100	0.0025	0.59138	0.0193	0.07032	0.0015	0.02568	0.0012	0.0012	639	37	472	12	438	9	512	23
05	603	8357	1985	0.42	0.06307	0.0022	0.61642	0.0159	0.07089	0.0014	0.02650	0.0012	0.0012	711	25	488	10	442	9	529	23
06	58	827	193	0.43	0.05522	0.0024	0.53727	0.0200	0.07057	0.0015	0.02344	0.0011	0.0011	421	47	437	13	440	9	468	22
07	55	687	186	0.37	0.05645	0.0023	0.54030	0.0175	0.06943	0.0014	0.02290	0.0011	0.0011	470	37	439	12	433	9	458	22
08	76	113	255	0.44	0.06106	0.0023	0.58683	0.0176	0.06971	0.0014	0.02368	0.0011	0.0011	641	32	469	11	434	9	473	22
09	99	159	332	0.48	0.05474	0.0022	0.52730	0.0172	0.06986	0.0015	0.02183	0.0011	0.0011	402	38	430	11	435	9	436	21
10	201	468	668	0.70	0.05766	0.0021	0.55867	0.0153	0.07028	0.0014	0.02268	0.0011	0.0011	517	29	451	10	438	9	453	22
11	120	151	392	0.38	0.05691	0.0021	0.56076	0.0165	0.07147	0.0015	0.02371	0.0012	0.0012	488	32	452	11	445	9	474	23
12	67	103	225	0.46	0.05650	0.0023	0.54223	0.0182	0.06962	0.0015	0.02402	0.0012	0.0012	472	39	440	12	434	9	480	24
13	210	639	614	1.04	0.05716	0.0021	0.63208	0.0184	0.08021	0.0016	0.02555	0.0014	0.0014	498	31	497	11	497	10	510	27
14	67	123	226	0.54	0.05744	0.0024	0.54656	0.0193	0.06902	0.0015	0.02154	0.0012	0.0012	508	42	443	13	430	9	431	24
15	118	288	394	0.73	0.06263	0.0024	0.60580	0.0187	0.07016	0.0015	0.02436	0.0014	0.0014	696	33	481	12	437	9	486	27
16	49	61	163	0.37	0.05414	0.0040	0.51615	0.0360	0.06914	0.0015	0.02161	0.0004	0.0004	377	169	423	24	431	9	432	8
17	51	81	169	0.48	0.05674	0.0024	0.55374	0.0195	0.07079	0.0015	0.02312	0.0014	0.0014	481	42	447	13	441	9	462	27
18	52	961	171	0.56	0.05901	0.0027	0.57420	0.0222	0.07058	0.0015	0.02261	0.0014	0.0014	567	48	461	14	440	9	452	27
19	107	2451	356	0.69	0.05469	0.0024	0.53057	0.0195	0.07037	0.0015	0.02241	0.0014	0.0014	400	46	432	13	438	9	448	28
21	87	141	283	0.50	0.05581	0.0024	0.55487	0.0203	0.07211	0.0015	0.02535	0.0017	0.0017	445	45	448	13	449	9	506	33
22	76	95	251	0.38	0.05732	0.0024	0.56211	0.0198	0.07113	0.0015	0.02371	0.0016	0.0016	504	42	453	13	443	9	474	31
23	141	253	465	0.54	0.05655	0.0026	0.55513	0.0215	0.07120	0.0015	0.02488	0.0017	0.0017	474	48	448	14	443	9	497	33
24	94	149	309	0.48	0.05539	0.0023	0.54277	0.0191	0.07107	0.0015	0.02269	0.0016	0.0016	428	42	440	13	443	9	453	31

注:有效测试点 23 个。





表 3 白日切特花岗闪长岩和中酸性火山岩主量元素 ( $10^{-2}$ ) 和微量元素 ( $10^{-6}$ ) 分析结果  
 Table 3 Major element components ( $10^{-2}$ ) and trace element abundances ( $10^{-6}$ ) of granodiorite and intermediate-acid volcanic rock

样品编号 岩性	11510/1 英安斑岩	11511/3 英安斑岩	11511/4 流纹斑岩	11511/5 安山岩	11511/6 流纹斑岩	11512/1 花岗闪长岩	11512/2 花岗闪长岩	11512/3 花岗闪长岩
SiO <sub>2</sub>	67.43	66.89	74.45	58.88	73.034	69.08	67.37	68.13
TiO <sub>2</sub>	0.29	0.34	0.33	0.76	0.37	0.27	0.29	0.42
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.20	14.35	13.13	17.41	13.43	16.18	17.01	15.56
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.07	2.13	0.96	2.81	1.14	1.10	1.27	1.68
FeO	2.11	3.40	1.19	3.42	1.70	1.12	1.51	1.46
MnO	0.09	0.07	0.03	0.10	0.06	0.04	0.05	0.06
MgO	1.66	2.46	0.99	3.19	1.31	1.13	1.23	1.44
CaO	5.29	1.60	1.78	5.46	1.72	2.36	2.32	3.01
Na <sub>2</sub> O	4.20	4.30	5.28	4.58	5.52	5.63	5.50	4.81
K <sub>2</sub> O	0.06	1.28	0.61	1.02	0.50	1.50	1.54	1.14
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.07	0.07	0.04	0.24	0.13	0.07	0.10	0.13
LOI	1.72	3.26	1.30	2.34	1.16	1.44	1.88	2.22
TOTAL	100.19	100.15	100.09	100.21	100.07	99.92	100.07	100.06
Mg#	37.78	45.20	46.22	48.87	46.14	48.84	45.24	46.35
里特曼指数 $\sigma$	0.70	1.30	1.10	1.97	1.20	1.95	2.03	1.41
A/CNK	0.73	1.07	0.89	0.80	0.89	0.91	0.97	0.90
La	20.50	8.13	40.60	14.50	25.00	15.50	10.30	21.90
Ce	35.0	16.5	72.8	31.0	43.3	26.7	19.5	38.5
Pr	3.63	1.95	8.55	4.29	4.95	3.01	2.23	4.22
Nd	13.60	8.06	32.20	18.70	18.90	11.20	8.52	15.00
Sm	2.59	1.81	5.63	4.12	3.79	1.82	1.82	2.59
Eu	0.715	0.599	1.170	1.340	0.893	0.614	0.735	0.767
Gd	2.61	1.88	4.69	3.93	3.77	1.39	1.83	2.41
Tb	0.494	0.394	0.761	0.713	0.742	0.161	0.325	0.397
Dy	3.130	2.580	3.480	3.800	4.430	0.678	1.870	1.990
Ho	0.670	0.614	0.664	0.732	0.963	0.099	0.351	0.356
Er	2.120	1.920	2.030	2.160	2.960	0.274	0.907	0.988
Tm	0.356	0.293	0.275	0.294	0.467	0.034	0.146	0.134
Yb	2.590	2.130	1.900	1.860	3.190	0.229	0.839	0.837
Lu	0.457	0.335	0.283	0.269	0.514	0.036	0.134	0.122
$\Sigma$ REE	88.46	47.20	175.03	87.71	113.87	61.75	49.51	90.21
$\Sigma$ LREE	76.04	37.05	160.95	73.95	96.83	58.84	43.11	82.98
$\Sigma$ HREE	12.43	10.15	14.08	13.76	17.04	2.90	6.40	7.23
$\Sigma$ LREE/ $\Sigma$ HREE	6.12	3.65	11.43	5.38	5.68	20.28	6.73	11.47
$\delta$ Eu	0.83	0.99	0.68	1.00	0.71	1.14	1.22	0.92
(La/Yb) <sub>N</sub>	5.34	2.57	14.41	5.26	5.28	45.63	8.28	17.64
(La/Sm) <sub>N</sub>	4.98	2.83	4.54	2.21	4.15	5.36	3.56	5.32
(Gd/Yb) <sub>N</sub>	0.81	0.71	1.99	1.71	0.95	4.90	1.76	2.32
Rb	1.13	36.80	17.50	27.00	13.90	54.60	50.40	34.70
Sr	402.00	64.50	242.00	502.00	225.00	317.34	442.53	397.96
Y	19.60	16.40	19.70	20.10	28.00	2.95	9.47	9.66
Nb	4.22	2.58	7.48	7.32	14.10	4.23	4.38	6.22
Cs	0.110	1.640	0.944	0.917	0.332	1.410	1.690	1.390
Ba	47.9	368.0	266.0	435.0	241.0	386.0	303.0	407.0
Hf	0.655	0.446	1.430	0.533	2.830	0.403	0.739	0.971
Ta	0.257	0.164	0.355	0.526	1.500	0.191	0.238	0.344
Th	7.90	2.73	25.40	1.04	13.30	8.01	5.09	9.30
U	0.381	0.558	1.230	0.578	3.150	0.539	0.955	1.040
Zr	18.20	62.43	175.01	159.75	141.35	67.68	106.09	137.00

注: 里特曼指数  $\sigma = (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) / (\text{SiO}_2 - 43)$ , 其中  $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{SiO}_2$  均为重量百分数;  $A/CNK = \text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ , 其中  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$  均为摩尔量。



显示岩石具有岛弧火山岩性质。

## 5 讨论

### 5.1 中酸性岩浆岩形成构造环境

元素 Rb、Y、Yb 及 Nb 元素之间的相互关系是判别花岗岩成分岩石形成大地构造环境的指示性元素,采用 Pearce et al. (1984, 1986)<sup>[40,41]</sup>有关花岗岩类岩石 Rb-Y+Nb 图解、Rb-Yb+Ta 图解、Nb-Y 图解、Ta-Yb 图解投图(图 12)结果显示,白日切特花岗闪长岩及中性-中酸性火山岩的样品点投入到火山弧花岗岩区,可以认为白日切特花岗闪长岩和中酸性火山岩形成于与俯冲造山有关的火山弧环境。

白日切特花岗闪长岩微量元素 Sr( $Sr=317\times 10^{-6}\sim 443\times 10^{-6}$ , 平均为  $386\times 10^{-6}$ ) 含量较高, Y、Yb ( $Y=2.95\times 10^{-6}\sim 9.66\times 10^{-6}<18\times 10^{-6}$ ,  $Yb=0.23\times 10^{-6}\sim 0.84\times$

$10^{-6}<1.9\times 10^{-6}$ ) 含量低, 结合主量元素  $SiO_2=67.37\%\sim 69.08\%>56\%$ ,  $MgO=1.13\%\sim 1.44\%<3\%$ ,  $Mg^\# = 45.24\sim 48.84<50$ , 认为该岩块具有埃达克岩性质。结合边千韬等<sup>[5,9]</sup>研究的早古生代亿可哈拉尔花岗闪长岩块的构造环境结果, 笔者认为白日切特花岗闪长岩属于原特提斯洋壳俯冲消减作用形成的岛弧型花岗岩。

白日切特中酸性火山岩呈断块状夹持于具岛弧性质的花岗闪长岩和海山玄武岩之间, 与周围混杂岩块均呈断层接触, 因其普遍存在绿泥及绿帘石等蚀变, 且原生流动状构造有明显后期构造变形特征, 流纹斑岩和花岗闪长岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素年龄分别为  $(438\pm 3)Ma$  ( $MSWD=2.0$ ) 和  $(441\pm 6)Ma$  ( $MSWD=0.76$ ) 在误差范围内一致, 均属早志留世初期原特提斯洋壳俯冲消减岩浆活动的产物。而在稀土元素配分曲线(图 11-a)显示花岗闪长

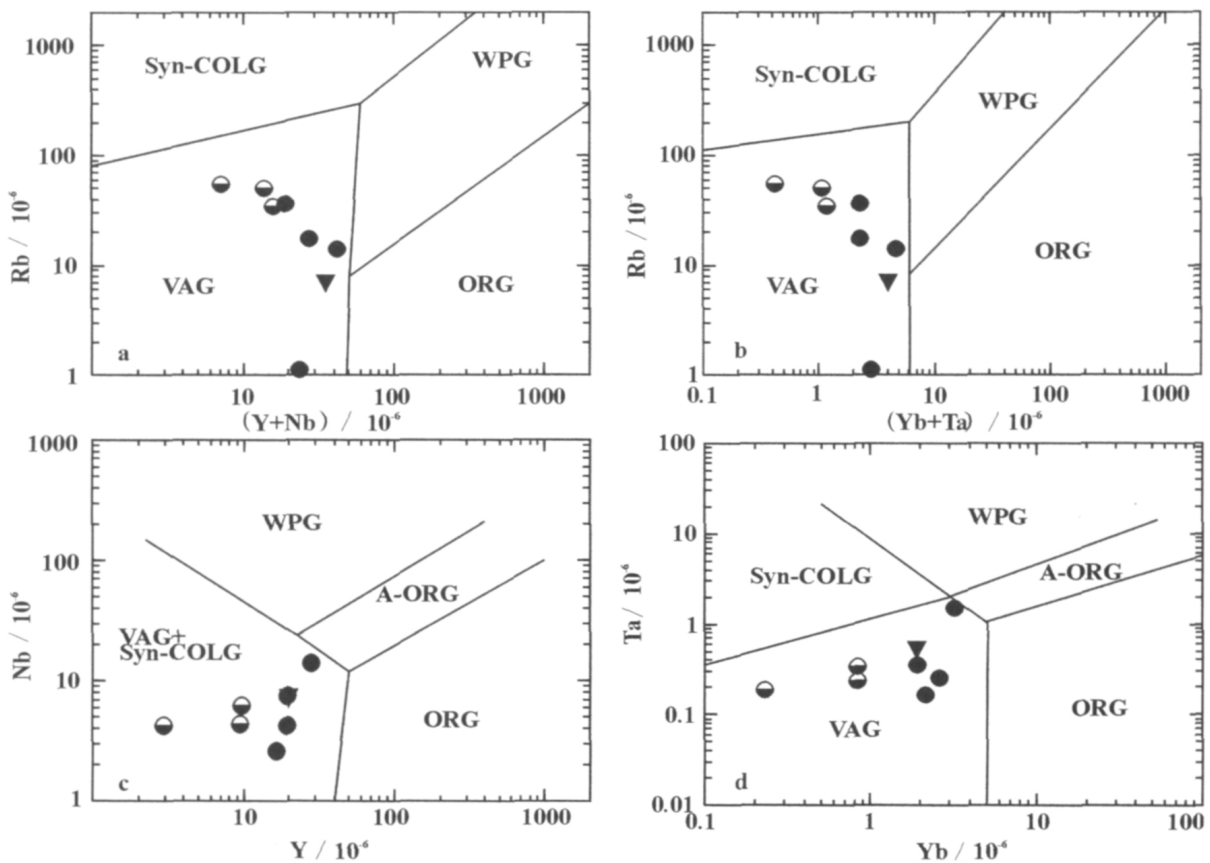


图 12 白日切特花岗闪长岩和中酸性火山岩微量元素构造环境判别图解<sup>[39-40]</sup>(图例同图 9)

VAG—火山弧花岗岩; Syn—COLG—同碰撞花岗岩; WPG—板内花岗岩; ORG—洋脊花岗岩; Post—COLG—后碰撞花岗岩

Fig.12 Diagrams of the tectonic setting of trace elements for granodiorite and intermediate-acid volcanic rock in Bairiqiete<sup>[39-40]</sup>

VAG=Volcanic Arc Granites; Syn-COLG=Syn-Collision Granites; WPG=Intraplate Granites; ORG=Ocean Ridge Granites;

Post-COLG=Post-Collision Granites

岩样品与中酸性火山岩样品曲线呈非平行斜交特征,特别是 Eu 之后的重稀土元素差距更大,揭示了二者并非同一岩浆源。

## 5.2 地质意义

布青山构造混杂岩带属于阿尼玛卿—布青山蛇绿岩带的西延部分,是由不同时代、不同类型、不同规模的各种构造岩块(片)构造混杂堆积在复理石基质岩中而成的。以往学者<sup>[5,6,12,13,16-19,22,23]</sup>认为东昆仑南缘阿尼玛卿—布青山蛇绿岩带主体代表了晚古生代古特提斯最北缘分支洋盆关闭后的洋壳残余体。而近年研究<sup>[5-8,15,25]</sup>表明东昆仑南缘布青山蛇绿混杂岩带存在早古生代蛇绿岩组合。同时也存在与早古生代洋壳俯冲相关的加里东晚期亿可哈拉尔岛弧型花岗—英云闪长岩<sup>[5,9]</sup>,岩石也具有埃达克质岩性质,指示有洋壳俯冲作用发生。最新获得该花岗闪长岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为(438±2)Ma(裴先治等,未刊资料),归属加里东晚期,表明早志留世发生过洋壳俯冲及岛弧岩浆活动,为早古生代蛇绿岩的存在提供了佐证。

笔者在布青山地区进行区域地质调查发现的白日切特异地型花岗闪长岩块和已经变形的中酸性火山岩块体与亿可哈拉尔花岗闪长岩块呈线性平行分布于蛇绿岩的北侧,与周围其他类型混杂岩块均呈断层接触关系,LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年获得花岗闪长岩块年龄为(441±6)Ma,中酸性火山岩块体年龄为(438±3)Ma,时代属于早志留世。岩石地球化学特征表明它们均形成于与洋壳俯冲消减相关的岛弧环境,共同证明了布青山地区早古生代晚期有过洋壳俯冲消减作用和岛弧岩浆活动,验证了早古生代得力斯坦蛇绿岩所代表的布青山地区原特提斯洋盆的存在,为东昆仑南缘布青山构造混杂岩带的构造演化提供了线索。

## 5.3 布青山地区早古生代构造演化

根据布青山地区构造混杂岩带的野外地质特征、岩石组合类型及形成时代,结合区域资料认为东昆仑南缘早古生代构造演化可分为以下几个阶段:新元古代晚期—早寒武世 Rodinia 超大陆裂解阶段,东昆仑及巴颜喀拉地区整体处于离散状态,位于其间的阿尼玛卿—布青山地区的原特提斯洋盆开启,布青山地区得力斯坦蛇绿岩(516±6 Ma)<sup>[25]</sup>以及阿尼玛卿地区玛积雪山洋中脊型辉长岩和以及苦海洋岛型辉长岩(555±9 Ma)<sup>[42-44]</sup>均是原特提斯洋在早

寒武世开启的有力证据。处于东昆中构造带的清水泉蛇绿岩(522~518 Ma)<sup>[45,46]</sup>为代表的洋盆也几乎同时打开;在东昆中清水泉向南西方向延伸的可可沙—科科可特一线的一套镁铁—超镁铁质混杂岩(509±7 Ma)<sup>[47]</sup>,也很可能就是代表东昆中与东昆南之间与得力斯坦蛇绿岩同时代的一个小洋盆。此后洋盆持续不断扩张,规模不断变大,而到晚寒武世—早志留世,原特提斯洋壳向北俯冲消减,晚寒武世东昆仑地块转变为具有沟—弧—盆体系的活动大陆边缘,早志留世沿阿尼玛卿—布青山构造带则形成了长条状岛弧型花岗质岩带,如:布青山地区亿可哈拉尔花岗闪长岩块<sup>[5,9]</sup>、阿尼玛卿地区德尔尼岛弧型闪长岩(493±6 Ma)<sup>[42-44]</sup>、布青山地区白日切特花岗闪长岩(441±6 Ma)以及中酸性火山岩(438±3 Ma)也形成于这一时期;位于东昆中清水泉—可可沙—科科可特一线发育的岛弧型中酸性侵入杂岩体(515~427 Ma)<sup>[48-49]</sup>,可能就是对该次洋壳俯冲事件的响应。早志留世洋脊扩张活动逐渐减弱,伴随着洋壳不断俯冲消减,原特提斯洋盆渐变为残余海盆。东昆仑地区加里东期造山作用,导致了东昆仑地块与巴颜喀拉地块在志留纪晚期碰撞拼合,阿尼玛卿—布青山原特提斯洋盆关闭,蛇绿岩逆冲就位,完成了阿尼玛卿—布青山原特提斯洋的构造演化历史。边千韬等<sup>[8]</sup>在得力斯坦沟泥质粉砂质板岩的夹层中获得的形成于半深海—浅海环境的中晚奥陶世疑源类化石,可能就是阿尼玛卿—布青山洋盆开始萎缩时的产物。区域上变质作用<sup>[14,50-53]</sup>表明至志留纪末,东昆仑地块和巴颜喀拉地块发生碰撞拼合,原特提斯洋完全闭合。在东昆仑地区分布的牦牛山组磨拉石沉积组合则反映了早古生代洋盆闭合的时间,其中牦牛山组底部流纹岩和上部英安岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄分别为(423±2)Ma 和(406±3)Ma<sup>[54-55]</sup>,限定了东昆仑地区牦牛山组形成于晚志留世—早泥盆世,也表明了原特提斯洋盆消失巴颜喀拉地块与东昆仑地块碰撞拼接。东昆仑地区晚志留世—早泥盆世牦牛山组磨拉石组合不整合于下覆地层之上的地质事实,进一步证实了早古生代构造旋回的结束和古特提斯洋演化的开始<sup>[16-17,53]</sup>。

## 6 结 论

(1)白日切特花岗闪长岩与中酸性火山岩均为异地构造岩块。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年结果

显示花岗闪长岩形成年龄为 $(441\pm 6)$ Ma,白日切特流纹斑岩形成年龄为 $(438\pm 3)$ Ma,表明流纹斑岩代表的中酸性火山岩和花岗闪长岩的形成时代均为早志留世初期。

(2)布青山构造混杂岩带白日切特花岗闪长岩地球化学特征为:高 Si,富 Al、Na,低 Ca、K、Mg、Fe、Ti、P;属于准铝质,钠质钙碱性系列;稀土元素总量( $\sum$ REE)较低,LREE 相对富集,HREE 相对亏损,REE 配分曲线呈 LREE 分馏较明显,HREE 分馏较不明显的右倾特征,基本上无铈异常,与岛弧钙碱性系列特征相似,并具有埃达克岩性质。中酸性火山岩为硅饱和,里特曼指数 $\sigma = 0.74\sim 1.97 < 3.3$ ,为准铝质,钙碱性系列;稀土元素总量( $\sum$ REE)较低,LREE 相对富集,HREE 相对亏损,REE 配分曲线呈 LREE 分馏较明显,HREE 分馏较不明显右倾特征,具有弱的负铈异常,与岛弧花岗岩相似。二者为与洋壳俯冲消减作用相关的非同源岩浆产物,因后期构造作用构造混杂在一起。

(3)白日切特花岗闪长岩和中酸性火山岩为布青山地区早古生代蛇绿岩代表的原特提斯洋壳俯冲消减时岩浆活动的标志。

### 参考文献(References):

- [1] 许志琴,杨经绥,陈方远.阿尼玛卿缝合带及“俯冲-碰撞”动力学 [C]//张旗主编.蛇绿岩与地球动力学研究.北京:地质出版社,1996:185-189.  
Xu Zhiqin, Yang Jingsui, Chen Fangyuan. A'nyemaqen suture and subduction-collision dynamics [C] //Zhang Qi (ed.). Study on Ophiolites and Dynamics. Beijing: Geological Publishing House, 1996:185-189(in Chinese with English abstract).
- [2] 许志琴,李海兵,杨经绥,等.东昆仑山南缘大型转换挤压构造带和斜向俯冲作用[J].地质学报,2001,75(2):156-164.  
Xu Zhiqin, Li Haibing, Yang Jingsui, et al. A large transpression zone at the south margin of the east Kunlun Mountains and oblique subduction [J]. 2001, 75 (2):156-164 (in Chinese with English abstract).
- [3] 王永标,黄继春,骆满生,等.海西-印支早期东昆仑造山带南侧古海洋盆地的演化 [J].地球科学——中国地质大学学报,1997,22(4):369-372.  
Wang Yongbiao, Huang Jichun, Luo Mansheng, et al. Paleo-Ocean evolution of the southern East Kunlun orogenic belt during Hercy-Early Indosinian [J]. Earth Science——Journal of China University of Geosciences, 1997, 22 (4):369-372 (in Chinese with English abstract).
- [4] 张克信,黄继春,殷鸿福,等.放射虫等生物群在非斯密斯地层研究中的应用——以东昆仑阿尼玛卿混杂岩带为例 [J].中国科学(D辑),1999,29(6):542-550.  
Zhang Kexin, Huang Jichun, Yin Hongfu, et al. The application of radiolarian biota in the study of non-smith strata: Exemplified by A'nyemaqen melange in Eastern Kunlun Orogen [J]. Science in China(Series D), 1999, 29(6):542-550(in Chinese).
- [5] 边千韬,罗小全,陈海泓,等.阿尼玛卿蛇绿岩带花岗岩-英云闪长岩锆石 U-Pb 同位素定年及大地构造意义 [J].地质科学,1999,34(4):420-426.  
Bian Qiantao, Luo Xiaoquan, Chen Haihong, et al. Zircon U-Pb age of granodiorite-tonalite in the A'nyemaqen ophiolitic belt and its tectonic significance [J]. Scientia Geologica Sinica, 1999, 34(4):420-426(in Chinese with English abstract).
- [6] 边千韬,罗小全,李红生,等.阿尼玛卿山早古生代和早石炭-早二叠世蛇绿岩的发现[J].地质科学,1999,34(4):523-524.  
Bian Qiantao, Luo Xiaoquan, Li Hongsheng, et al. Discovery of early Paleozoic and early carboniferous-early permian ophiolites in the A'nyemaqen, Qinghai province, China [J]. Scientia Geologica Sinica, 1999, 34(4):523-524(in Chinese with English abstract).
- [7] 边千韬,罗小全,李涤微,等.青海省阿尼玛卿布青山蛇绿混杂岩的地球化学性质及形成环境 [J].地质学报,2001,75(1):45-55.  
Bian Qiantao, Luo Xiaoquan, Li Dihui, et al. Geochemistry and formation environment of the Buqingshan ophiolite complex, Qinghai Province, China [J]. Acta Geologica Sinica, 2001, 75(1):45-55 (in Chinese with English abstract).
- [8] 边千韬,尹磊明,孙淑芬,等.东昆仑布青山蛇绿混杂岩中发现奥陶纪疑源类[J].中国科学(D辑),2001,46(2):167-171.  
Bian Qiantao, Yi Leiming, Sun Shufen, et al. Discovery of Ordovician acritarch in Buqingshan area in the East Kunlun mountains [J]. Science in China(Series D), 2001, 46(2):167-171 (in Chinese).
- [9] 边千韬, Pospelov Igor I, 李惠民,等.青海省布青山早古生代末期埃达克岩的发现及其构造意义[J].岩石学报,2007,23(5):925-934.  
Bian Qiantao, Pospelov Igor I, Li Huimin, et al. Discovery of the end-early paleozoic adakite in the Buqingshan area, Qinghai Province, and its tectonic implications [J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(5):925-934(in Chinese with English abstract).
- [10] 张国伟,张本仁,袁学成,等.秦岭造山带与大陆动力学 [M].北京:科学出版社,2001:451.  
Zhang Guowei, Zhang Benren, Yuan Xuecheng, et al. Qinling Orogenic Belt and Continental Dynamics [M]. Beijing: Science Press, 2001:451(in Chinese with English abstract).
- [11] 张国伟,董云鹏,赖绍聪,等.秦岭-大别造山带南缘勉略构造带

- 与勉略缝合带[J]. 中国科学(D辑), 2003, (12):1121-1135.
- Zhang Guowei, Dong Yunpeng, Lai Shaocong, et al. Mianlue tectonic belt and Mianlue paleo-suture on the southern margin of the Qinling-Dabie Orogenic Belt [J]. Science in China (Series D), 2003, 33(12): 1121-1135(in Chinese).
- [12] 裴先治. 勉略-阿尼玛卿构造带的形成演化与动力学特征[D]. 西安:西北大学博士学位论文. 2001:1-155.
- Pei Xianzhi. Geological evolution and dynamics of the Mianlue-A'nyemaqen tectonic zone, central China [D]. Xi'an:Ph.D. thesis at Northwestern University, 2001:1-155 (in Chinese with English abstract).
- [13] 裴先治, 张国伟, 赖绍聪, 等. 西秦岭南缘勉略构造带主要地质特征[J]. 地质通报, 2002, 21(8/9):484-494.
- Pei Xianzhi, Zhang Guowei, Lai Shaocong, et al. Main geological features of the Mianlue tectonic belt on the southern margin of the West Qinling[J]. Geological Bulletin of China, 2002, 21(8/9):484-494(in Chinese with English abstract).
- [14] 殷鸿福, 张克信. 中华人民共和国区域地质调查报告 冬给错拉纳湖幅 1:47C001002 1:25 万 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2003:1-457.
- Yin Hongfu, Zhang Kexin. The People's Republic of China Regional Geological Survey Report of Donggeicuonahu 147C001002 1:250000[M]. Wuhan:China University of Geosciences Press, 2003:1-457(in Chinese with English abstract).
- [15] Bian Qiantao, Li Dihui, Pospelov I, et al. Age, geochemistry and tectonic setting of Buqingshan ophiolites, North Qinghai-Tibet Plateau, China[J]. J. Asian Earth Sci., 2004, 23:577-596.
- [16] 杨经绥, 王希斌, 史仁灯, 等. 青藏高原北部东昆仑南缘德尔尼蛇绿岩: 一个被肢解的古特提斯洋壳[J]. 中国地质, 2004, 31(3):225-238.
- Yang Jingsui, Wang Xibin, Shi Rendeng, et al. The Dur'ngoi ophiolite in East Kunlun, northern Qinghai-Tibet plateau: a fragment of paleo-tethyan oceanic crust [J]. Geology in China, 2004, 31(3): 225-238(in Chinese with English abstract).
- [17] 杨经绥, 许志琴, 李海兵, 等. 东昆仑阿尼玛卿地区古特提斯火山作用和板块构造体系[J]. 岩石矿物学杂志, 2005, 24(5):369-380.
- Yang Jingsui, Xu Zhiqin, Li Haibing, et al. The paleo-tethyan volcanism and plate tectonic regime in the A'nyemaqen region of East Kunlun, northern Tibet Plateau [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2005, 24 (5):369-380 (in Chinese with English abstract).
- [18] 郭安林, 张国伟, 孙延贵, 等. 阿尼玛卿蛇绿岩带 OIB 和 MORB 的地球化学及空间分布特征: 玛积雪山古洋脊热点构造证据[J]. 中国科学(D辑), 2006, 36(7):618-629.
- Guo Anlin, Zhang Guowei, Sun Yangui, et al. Geochemistry and distribution characteristics of OIB and MORB in A'nyemaqen Ophiolite belt: Evidence to Majixueshan paleo-oceanic-ridge hot-spot structure [J]. Science in China(Series D), 2006, 36(7):618-629 (in Chinese).
- [19] Yang Jingsui, Shi Rendeng, Wu Cailai, et al. Dur'ngoi ophiolite in East Kunlun, Northeast Tibetan Plateau: Evidence for Paleo-Tethyan Suture in Northwest China [J]. Journal of Earth Science, 2009, 20(2):303-331.
- [20] Molnar P, Burchfiel B C, Zhao Z Y, et al. Geologic evolution of northern Tibet: Results of an expedition to Ulugh Muztagh [J]. Science, 1987, 235:299-305.
- [21] Burchfiel B C, Molnar P, Zhao Z Y, et al. Geology of the Ulugh Muztagh area, northern Tibet [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1989, 94:57-70.
- [22] 陈亮, 孙勇, 柳小明. 青海省德尔尼蛇绿岩的地球化学特征及其大地构造意义[J]. 岩石学报, 2000, 16(1):106-110.
- Chen Liang, Sun Yong, Liu Xiaoming. Geochemistry of Dorni ophiolite and its tectonic significance [J]. Acta Petrologica Sinica, 2000, 16(1):106-110(in Chinese with English abstract).
- [23] 陈亮, 孙勇, 裴先治. 德尔尼蛇绿岩  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  年龄: 青藏最北端古特提斯洋盆存在和延展的证据 [J]. 科学通报, 2001, 46(45):424-426.
- Chen Liang, Sun Yong, Pei Xianzhi. The  $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$  ages of the Dur'ngoi ophiolites: Evidence of ancient Tethys ocean basin in north Tibet[J]. Chinese Science Bulletin, 2001, 46(45):424-426(in Chinese).
- [24] 陈亮, 孙勇, 裴先治, 等. 古特提斯蛇绿岩的综合对比及其动力学意义——以德尔尼蛇绿岩为例[J]. 中国科学(D辑), 2003, 33(12):1136-1142.
- Chen Liang, Sun Yong, Pei Xianzhi, et al. Comparison of eastern Paleo-Tethyan Ophiolites and its geodynamics significance——Evidence from Dur'ngoi ophiolite[J]. Science in China(D), 2003, 33(12):1136-1142(in Chinese).
- [25] 刘战庆, 裴先治, 李瑞保, 等. 东昆仑南缘阿尼玛卿构造带布青山地区两期蛇绿岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及其构造意义[J]. 地质学报, 2011, 85(2):185-194.
- Liu Zhanqing, Pei Xianzhi, Li Ruibao, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb geochronology of the two suites of ophiolites at the Buqingshan area of the A'nyemaqen orogenic belt in the southern margin of East Kunlun and its tectonic implication [J]. Acta Geologica sinica, 2011, 85 (2):185-194 (in Chinese with English abstract).
- [26] 姜春发, 杨经绥, 冯秉贵, 等. 昆仑开合构造[M]. 北京:地质出版社, 1992:1-217.
- Jiang Chunfa, Yang Jingsui, Feng Bingui, et al. Opening Closing Tectonics of Kunlun Mountains[M]. Beijing:Geological Publishing

- House, 1992:1-217(in Chinese with English abstract).
- [27] 王国灿, 张天平, 梁斌, 等. 东昆仑造山带东段昆中复合蛇绿混杂岩带及“东昆中断裂带”地质涵义[J]. 地球科学, 1999, 24(2): 130-133.
- Wang Guocan, Zhang Tianping, Liang Bin, et al. Composite ophiolitic melange zone in central part of eastern section of Eastern Kunlun orogenic zone and geological significance of “fault belt in central part of eastern section of Eastern Kunlun orogenic zone”[J]. Earth Science, 1999, 24 (2):130-133 (in Chinese with English abstract).
- [28] 柳小明, 高山, 袁洪林, 等. 193nm LA-ICPMS 对国际地质标准参考物质中 42 种主量和微量元素的分析[J]. 岩石学报, 2002, 18(3):408-418.
- Liu Xiaoming, Gao Shan, Yuan Honglin, et al. Analysis of 42 maior and trace elements in glass standard reference materials by 193nm LA-ICPMS[J]. Acta Petrologica Sinica, 2002, 18(3):408-418(in Chinese with English abstract).
- [29] 袁洪林, 吴福元, 高山, 等. 东北地区新生代侵入体的锆石激光探针 U-Pb 年龄测定与稀土元素成分分析 [J]. 科学通报, 2003, 48(14):1511-1520.
- Yuan Honglin, Wu Fuyuan, Gao Shan, et al. LA-ICPMS zircon U-Pb age and REE of Cenozoic pluton in NE China [J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(14):1511-1520(in Chinese).
- [30] Yuan Honglin, Wu Fuyuan, Gao Shan, et al. Determination of U-Pb age and rare earth element concentration of zircons from Cenozoic intrusions in northeastern China by laser ablation ICP-MS[J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(32):2411-2421.
- [31] Yuan Honglin, Gao Shan, Liu Xiaoming, et al. Accurate U-Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation - inductively coupled plasma-mass spectrometry[J]. Geostandards and Geoanalytical Research, 2004, 28(3):353-370.
- [32] Pidgeon R. T, Wilde S. A. The interpretation of complex zircon U-Pb systems in Archaean granitoids and gneisses from the Jack Hills, Narryer Gneiss Terrane, Western Australia [J]. Precambrian Research, 1998, 91(3/4):309-332.
- [33] Claesson S, Vetrin V, Bayanova T, et al. U-Pb zircon ages from a Devonian carbonatite dyke, Kola peninsula, Russia: a record of geological evolution from the Archaean to the Palaeozoic Original Research Article Lithos, 2000, 51(1/2):95-108.
- [34] 简平, 程裕淇, 刘敦一. 变质锆石成因的岩相学研究——高级变质岩 U-Pb 年龄解释的依据[J]. 地学前缘, 2001, 8(3):183-191.
- Jian Ping, Cheng Yuqi, Liu Dunyi. Petrographical study of metamorphic zircon: basic roles in interpretation of U-Pb age of high grade metamorphic rocks [J]. Earth Science Frontiers, 2001, 8(3): 183-191(in Chinese with English abstract).
- [35] 吴元保, 郑永飞. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约[J]. 科学通报, 2004, 49(16):1589-1604.
- Wu Yuanbao, Zheng Yongfei. Zircon minerageny and its restriction on interpretation of U-Pb age [J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49(16):1589-1604(in Chinese).
- [36] Le Maitre R. W. A new approach to the classification of igneous rocks using the basalt-andesite -dacite-rhyolite suite as a example [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1976, 56 (2):191-203.
- [37] Middlemost E A K. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. Earth Science Reviews, 1994, 37:215-224.
- [38] Boynton W V. Cosmochemistry of the rare earth elements, Meteorite studies Dev, Geochem, 1984, 2: 63-114.
- [39] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes [C]//Saunders A D, Norry M J. Magmatism in the Ocean Basins. Geological Society Special Publication, 1989, 42:313-345.
- [40] Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. Journal of Petrology, 1984, 25(4):956-983.
- [41] Pearce J A. Sources and setting of granitic rocks [J]. Episodes, 1986, 19(4):120-125.
- [42] 李王晔, 李曙光, 郭安林, 等. 青海东昆仑构造带苦海辉长岩和德尔尼闪长岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及痕量元素地球化学——对“祁-柴-昆”晚新元古代-早奥陶世多岛洋南界的制约 [J]. 中国科学(D 辑), 2007, 37(增刊 ):288-294.
- Li Wangye, Li Shuguang, Guo Anlin, et al. The Zircon SHRIMP U-Pb ages and trace elements geochemistry of Kuhai gabbro and Dur'ngoi diorite in eastern Kunlun tectonic belt of Qinghai Province: implications for south margin of archipelagic ocean in Late Neoproterozoic -Early Ordovician of “Qin -Qi -Kun” Orogenic System [J]. Science in China (Ser.D), 2007, 50(Supp. ):331-338(in Chinese).
- [43] 李王晔. 西秦岭-东昆仑造山带蛇绿岩及岛弧型岩浆岩的年代学和地球化学研究[D]. 合肥:中国科学技术大学博士学位论文, 2008:1-154.
- Li Wangye. Geochronology and Geochemistry of the Ophiolites and Island-arc -type Igneous Rocks in the Western Qinling Orogen and the Eastern Kunlun Orogen: Implication for the Evolution of the Tethyan Ocean [D]. Hefei: University of Science and Technology of China a Dissertation for Doctor's Degree, 2008:1-154(in Chinese with English abstract).
- [44] Li Wangye, Li Shuguang, Guo Anlin, et al. Zircon SHRIMP U-Pb ages and trace element geochemistry of the Kuhai gabbro and the Dur'ngoi diorite in the southern east Kunlun tectonic belt and their geological implications[J]. Science in China(Ser. D), 2007, 50(Supp.):331-338.



- [45] Yang Jingsui, Robinson P T, Jiang Chunfa, et al. Ophiolites of the Kunlun Mountains, China and their tectonic implications [J]. *Tectonophysics*, 1996, 258:215-231.
- [46] 陆松年, 于海峰, 赵凤清, 等. 青藏高原北部前寒武纪地质初探 [M]. 北京:地质出版社, 2002:1-125.  
Lu Songnian, Yu Haifeng, Zhao Fengqing, et al. A Preliminary Study of Pre-Cambrian Geology in the North Part of Qinghai-Tibetan Plateau [M]. Beijing:Geological Publishing House, 2002: 1-125(in Chinese with English abstract).
- [47] 冯建赞, 裴先治, 于书伦, 等. 东昆仑都兰可可沙地区镁铁-超镁铁质杂岩的发现及其 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄 [J]. *中国地质*, 2010, 37(1):28-37.  
Feng Jianyun, Pei Xianzhi, Yu Shulun, et al. The discovery of the mafic-ultramafic melange in Kekesha area of Dulan County, East Kunlun region, and its LA-ICP-MS zircon U-Pb age [J]. *Geology in China*, 2010, 37(1):28-37(in Chinese with English abstract).
- [48] 朱云海, 张克信, 王国灿. 东昆仑复合造山带蛇绿岩、岩浆岩及构造岩浆演化 [M]. 武汉:中国地质大学出版社, 2002:104-105.  
Zhu Yunhai, Zhang Kexin, Wang Guocan. Evolution of Ophiolite, Magma and Tectonic Magma in Eastern Kunlun Compound Orogenic Belt [M]. Wuhan:China University of Geosciences Press, 2002: 104-105(in Chinese with English abstract).
- [49] 张亚峰, 裴先治, 丁仁平等. 东昆仑都兰县可可沙地区加里东期石英闪长岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄及其意义 [J]. *地质通报*, 2010, 29(1):79-85.  
Zhang Yafeng, Pei Xianzhi, Din Saping, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb age of quartz diorite at the Kekesha area of Dulan County, eastern section of the East Kunlun orogenic belt, China and its significance [J]. *Geological Bulletin of China*, 2010, 29(1):79-85 (in Chinese with English abstract).
- [50] 张建新, 孟繁聪, 万渝生, 等. 柴达木盆地南缘金水口群的早古生代构造热事件: 锆石 U-Pb SHRIMP 年龄证据 [J]. *地质通报*, 2003, 22(6):397-404.  
Zhang Jianxin, Meng Fancong, Wan Yusheng, et al. Early paleozoic tectono-thermal event of the Jinshuikou Group on the southern margin of Qaidam; zircon U-Pb SHRIMP age evidence [J]. *Geological Bulletin of China*, 2003, 22(6):397-404(in Chinese with English abstract).
- [51] 陈能松, 何蕾, 孙敏. 东昆仑造山带早古生代变质峰期和逆冲构造变形年代的精确限定 [J]. *科学通报*, 2002, 47(8):628-632.  
Chen Nengsong, He Lei, Sun Min. Eopaleozoic metamorphic peak period and thrust of tectonic deformation's precise limits of East Kunlun orogenic belt [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(8): 628-632(in Chinese with English abstract).
- [52] 陈能松, 李晓彦, 张克信, 等. 东昆仑山香日德南部白沙河岩组的岩石组合特征和形成年代的锆石 Pb-Pb 定年启示 [J]. *地质科技情报*, 2006, 25(6):1-7.  
Chen Nengsong, Li Xiaoyan, Zhang Kexin, et al. Lithological characteristics of the Baishahe formation to the south of Xiangride town, Eastern Kunlun mountains and its age constrained from zircon Pb-Pb dating [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2006, 25(6):1-7(in Chinese with English abstract).
- [53] 陈能松, 孙敏, 王勤燕, 等. 东昆仑造山带中带的锆石 U-Pb 定年与构造演化启示 [J]. *中国科学(D 辑)*, 2008, 38(6):657-666.  
Chen Nengsong, Sun Min, Wang Qinyan, et al. The implication of zircon U-Pb dating and tectonic evolution in the middle section of East Kunlun orogenic belt [J]. *Science in China (series D)*, 2008, 38(6):657-666 (in Chinese).
- [54] 陆露, 吴珍汉, 胡道功, 等. 东昆仑牦牛山组流纹岩锆石 U-Pb 年龄及构造意义 [J]. *岩石学报*, 2010, 26(4):115-1158.  
Lu Lu, Wu Zhenhan, Hu Daogong, et al. Zircon U-Pb age for rhyolite of the Maoniushan formation and its tectonic significance in the East Kunlun Mountains [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(4):115-1158(in Chinese).
- [55] 张耀玲, 胡道功, 石玉若, 等. 东昆仑造山带牦牛山组火山岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其构造意义 [J]. *地质通报*, 2010, 29(11):1614-1618.  
Zhang Yaoling, Hu Daogong, Shi Yuruo, et al. SHRIMP zircon U-Pb ages and tectonic significance of Maoniushan formation volcanic rocks in East Kunlun orogenic belt, China [J]. *Geological Bulletin of China*, 2010, 29(11):1614-1618 (in Chinese with English abstract).

## Early Paleozoic intermediate–acid magmatic activity in Bairiqiete area along the Buqingshan tectonic melange belt on the southern margin of East Kunlun : Constraints from zircon U–Pb dating and geochemistry

LIU Zhan–qing, PEI Xian–zhi, LI Rui–bao, LI Zuo–chen, CHEN You–xin,  
GAO Jing–min, LIU Cheng–jun, WEI Fang–hui, WANG Xue–liang, ZHANG Gang

(Key Laboratory of Western Mineral Resources and Geological Engineering of Ministry of Education, School of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an, 710054, Shaanxi, China)

**Abstract:** Based on 1:50 000 regional geological mapping on the southern margin of the East Kunlun Mountains and using methods of detailed field section measurement and petrologic analysis as well as LA–ICP–MS zircon U–Pb dating and geochemical investigation, the authors studied the intermediate–acid magmatic rocks in Bairiqiete area of the Buqingshan tectonic melange belt. The results show that the rocks are mainly granodiorite with  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  average weighted age of  $441\pm 6$  Ma (MSWD=0.75) and intermediate–acid volcanic rock such as rhyolite–porphyry with  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  average weighted age of  $438\pm 3$  Ma (MSWD=2.0). Geochemically, the former is characterized by high content of Si, Al and Na and should belong to the Na–enriched calc–alkali series, whereas the latter is of Si–saturated, aluminous and calc–alkali series. These two kinds of rocks are characterized by low  $\sum$  REE content and relatively enriched LREE and depleted HREE, with LREE differentiated more evidently than HREE, and show right–inclination pattern in REE patterns, without or with weak Eu anomalies. All of these features are similar to features of the island–arc calc–alkali series in relation to subduction, representing the volcanic–arc products of the subduction of east proto–Tethys crust in Early Silurian. The results obtained by the authors provide new evidence for the study of the evolution of east proto–Tethys Ocean.

**Key words:** southern margin of east Kunlun region; Bairiqiete; tectonic melange; intermediate–acid volcanic; granodiorite; LA–ICP–MS zircon U–Pb geochronology; litho–geochemistry

**About the first author:** LIU Zhan–qing, male, born in 1975, doctor candidate, engages in the study of tectonic geology and regional geology; E–mail: liu\_zq100157@sohu.com.

**About the corresponding author:** PEI Xian–zhi; E–mail: peixzh@263.com.